

Н.Г. Ефименко, д-р техн. наук, О.Ю. Атоженко, Харьков, Украина

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 15X1M1ФЛ, ВЫПОЛНЕННЫХ СПОСОБОМ ПОПЕРЕЧНОЙ ГОРКИ

Досліджувались механічні властивості зварних з'єднань із сталі 15X1M1ФЛ після зварювання способом поперечної гірки без підігріву. Вказаний спосіб забезпечує високі показники міцності і пластичності високотемпературної ділянки ЗТВ і наплавленого металу. Характеристики пластичності однакові для зварних з'єднань, як без термічної обробки, так і з високим відпуском після зварювання. Отримані результати досліджень дають підставу рекомендувати відміну попереднього підігріву, а також термічної обробки вузлів після зварювання при використанні вказаного способу.

Ключові слова: сталь 15X1M1ФЛ, зварювання, крихке руйнування, відпуск, механічні властивості

Исследовались механические свойства сварных соединений из стали 15X1M1ФЛ после сварки способом поперечной горки без подогрева. Указанный способ обеспечивает высокие показатели прочности и пластичности высокотемпературной области ЗТВ и наплавленного металла. Характеристики пластичности одинаковые для сварочных соединений, как без термической обработки, так и с высоким отпуском после сварки. Полученные результаты исследований дают основания рекомендовать отмену предыдущего подогрева, а также термической обработки узлов после сварки при использовании указанного способа.

Ключевые слова: сталь 15X1M1ФЛ, сварка, хрупкое разрушение, отпуск, механические свойства

N.G. EFIMENKO, O.YU. ATOZHENKO

MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED CONNECTIONS OF STEEL 15X1M1ФЛ, EXECUTED IN THE WAY OF THE CROSS-SECTION HILL

Mechanical properties of welded joints of 15X1M1ФЛ (Cr-Mn-V) steel after welding using the split pass method without heating were studied. After applying such a welding mode, strength and plasticity of the weld-adjacent zone and the weld bead were high. Plasticity characteristic were equal for welded joints both without heat treatment and with high-temperature tempering after welding. Impact elasticity of all zones at room temperature of testing decreases dramatically, but metal of the weld-adjacent zone resists harder to brittle failure which is proved by studying the fractures.

Key words: steel Cr-Mn-V, welding, mechanical properties, brittle failure tempering

Известны технологические способы сварки массивных толстостенных конструкций из низколегированных сталей с ограниченной свариваемостью, которые без предварительного подогрева и последующей термообработки обеспечивают высокую работоспособность и надежность изделий при эксплуатации [1,2]. К таким относится способ ручной многопроходной сварки поперечной горкой, при котором, благодаря автоподогреву, в сварном соединении обеспечивается структура без участков разупрочнения и охрупчивания [1, 3].

До настоящего времени остается актуальной проблема отмены предварительного и сопутствующего подогрева при сварке и заварке дефектов крупногабаритных литых конструкций энергетического оборудования, изготавливаемого из теплоустойчивой стали 15X1M1ФЛ. Известно [4], что подог-

рев сложно влияет на свариваемость сталей и может привести к дополнительному охрупчиванию металла шва и зоны термического влияния. Кроме того, проведение сварки с подогревом и последующей термообработкой требует дополнительных энергозатрат, а в производственных условиях их осуществление не всегда представляется возможным.

В данной работе изучали влияние способа сварки поперечной горкой на механические свойства сварных соединений из стали 15X1M1ФЛ, определяемые при стандартных испытаниях и характеризующие сопротивление разрушению при нормальных температурах.

Исследовали ремонтные заварки заготовок диаметром 120 мм, длиной ~ 300 мм, отлитые в заводских условиях и подвергнутые термической обработке (нормализации и отпуску при 720-750°C). Разделку металла под сварку выполняли механическим способом вдоль длины заготовок. Размеры разделки: глубина – 60 мм, ширина – 40 мм, длина – 120 мм. Заварку имитируемого дефекта производили ручным способом электродами ТМЛ-ЗУ типа Э09Х1МФ диаметром 4 мм без предварительного подогрева. Режим сварки: $I_{св}=160-170\text{A}$, $U_c=28\text{В}$. Толщина наплавляемых слоев ~ 4 мм.

После сварки одну из заготовок подвергали высокому отпуску при $t_n=720-750^\circ\text{C}$ согласно штатной технологии. Заготовки разрезались в поперечном направлении на темплеты для макроанализа и измерения твердости по НВ₅. При макроисследовании дефектов не выявлено, швы отличаются высокой сплошностью, ширина зоны термического влияния составляет 2,5-3,8 мм. Из этих темплетов, согласно схемы *рис.1*, вырезались заготовки для изготовления разрывных и ударных образцов. Прочностные и пластические характеристики различных зон сварных соединений определялись по известной методике при комнатной температуре. Ударная вязкость определялась при температурах от -20 до +350°C при испытании стандартных образцов с полукруглым надрезом (типа Менаже), вырезанных из различных участков сварных соединений.

Это дало возможность оценить влияние сварки способом поперечной горки без предварительного подогрева на свойства высокотемпературного участка зоны термического влияния (ЗТВ) и наплавленного металла (шва) и сравнить их со свойствами основного металла.

Установлено, что на уровне средней части шва значение твердости ЗТВ и наплавленного металла сварного соединения, не подвергавшегося отпуску после сварки, выше по сравнению с основным металлом (*рис.2*). Однако, ее максимальные значения не достигают допустимых показателей для стали 15X1M1ФЛ, свариваемой по принятой технологии [5,6]. Твердость всех зон сварного соединения, подвергавшегося отпуску, сильно снижается но остается выше твердости основного металла. Такое различие, очевидно, связано с тем, что при сварке способом поперечной горки металл ЗТВ и шва, находясь в напряженном состоянии, испытывает пластическую деформацию, в резуль-

тате которой происходит дислокационное упрочнение субструктуры зерен твердого раствора, сохраняющееся после высокого отпуска.

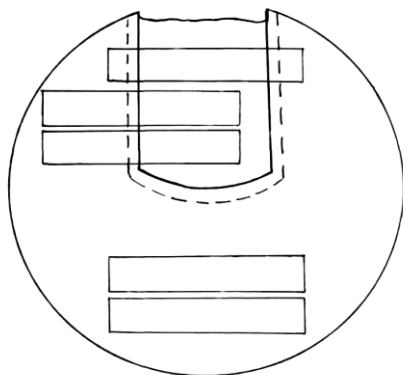


Рисунок 1 – Схема вырезки разрывных и ударных образцов из различных участков сварных соединений стали 15Х1М1ФЛ

Прочностные характеристики металла различных участков соединений, как без термообработки, так и с термообработкой (рис.3) превышают нормы, установленные РТМ для стали 15Х1М1ФЛ в нормализованном и отпущенном состоянии ($\sigma_b \leq 637$ МПа; $\sigma_{0,2} \leq 450$ МПа).

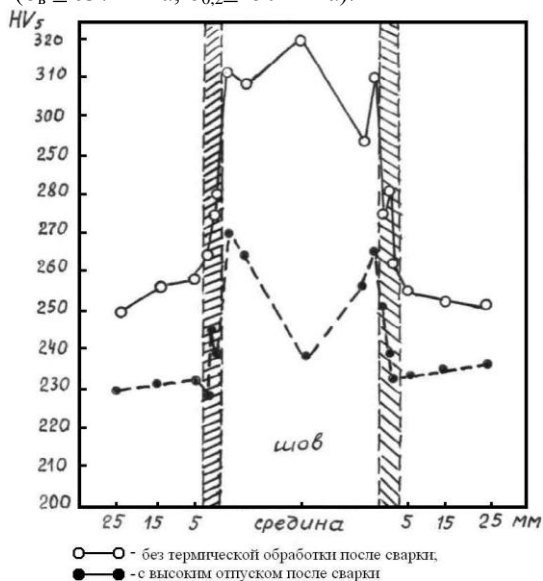


Рисунок 2 – Изменение твердости сварного соединения из стали 15Х1М1ФЛ после сварки на расстоянии 25 мм от поверхности шва

В сварном соединении без термической обработки уровень значений σ_B практически одинаков во всех зонах, несмотря на значительное повышение твердости в высокотемпературной области ЗТВ и в металле шва (см. рис.2); предел текучести $\sigma_{0,2}$ металла ЗТВ и шва несколько повышается по сравнению с основным металлом. После сварки и высокого отпуска значения σ_B и $\sigma_{0,2}$ металла всех зон снижаются (~ на 100 Н/мм^2), причем $\sigma_{0,2}$ основного металла и ЗТВ одинаковый, а металла шва значительно выше. Из приведенных данных следует, что после сварки без подогрева в ЗТВ и наплавленном металле происходит небольшое повышение прочностных характеристик по сравнению с основным металлом.

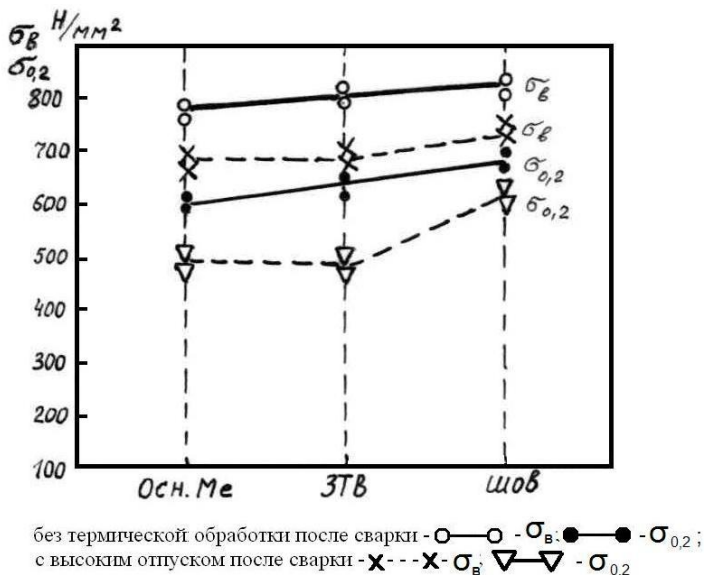
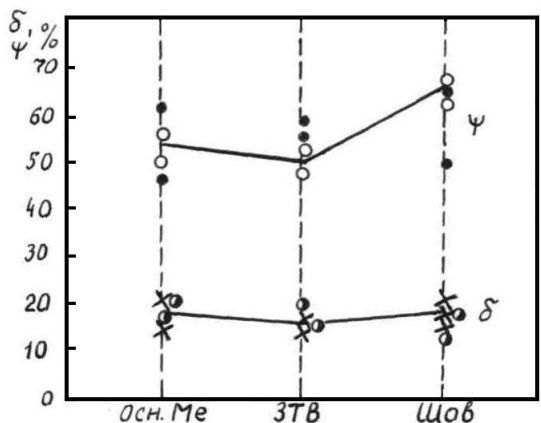


Рисунок 3 – Изменение прочностных свойств различных зон сварных соединений из стали 15Х1М1ФЛ

Относительное удлинение (δ) во всех зонах практически одинаково и соответствует уровню 18-20%, как для образцов без термической обработки после сварки, так и с высоким отпуском после сварки (рис.4). Относительное сужение (ψ) имеет высокие значения для всех зон (более 50%). Однако, наиболее высокие значения ψ имеет металл шва после сварки без термической обработки (68%). В основном металле и ЗТВ значения ψ несколько ниже. После высокого отпуска значения ψ в ЗТВ повышаются, а в основном и наплавленном металле наблюдается большой разброс его значений, что может быть признаком перехода от пластичного к хрупкому состоянию. [5].



без термической обработки после сварки - \times - δ %, \circ - ψ %;
с высоким отпуском после сварки - \bullet - δ %, \bullet - ψ %.

Рисунок 4 – Изменение пластических характеристик различных зон сварных соединений из стали 15Х1М1ФЛ

При анализе результатов, полученных при испытаниях на ударный изгиб при $+20^{\circ}\text{C}$ металла всех исследуемых зон сварных соединений в состоянии как после сварки, так и после отпуска, установлено, что их абсолютные значения близки и невысокие (рис. 5 и 6). Такие уровни ударной вязкости получены и в работах [4,6]. Объясняется это тем, что переходная критическая температура хрупкости для теплоустойчивых сталей типа 15Х1М1ФЛ находится выше $+20^{\circ}\text{C}$.

Отмечается тенденция повышения КСУ металла всех зон сварного соединения после высокого отпуска, однако в основном металле она остается более высокой. Это объясняется тем, что до сварки основной металл находится в отпущенном состоянии, а отпуск заготовок, проведенный после сварки, повышает его вязкость [6]. Значения ударной вязкости при $+20^{\circ}\text{C}$ металла высокотемпературной области ЗТВ и наплавленного металла, подвергнутых высокому отпуску, приближаются к значениям основного металла в исходном состоянии (КСУ наплавленного металла – $92 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$, ЗТВ – $105 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$, основного металла – $96 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$). Эти данные позволяют сделать вывод о том, что сварка способом поперечной горки не снижает сопротивление хрупкому разрушению в зоне термического влияния и шве по сравнению с основным металлом.

При изучении изломов ударных образцов было выявлено, что после испытания при $+20^{\circ}\text{C}$ в основном и наплавленном металле образуется 100% хрупкий излом, а в ЗТВ – смешанный с 30% вязкой составляющей (как в образцах без термообработки, так и с высоким отпуском). В образцах, испытанных при 0°C , в ЗТВ также образуется смешанный излом, но в образцах без

термической обработки больше вязкой составляющей (~ 20%), чем в образцах с высоким отпуском (~ 2% вязкой составляющей).

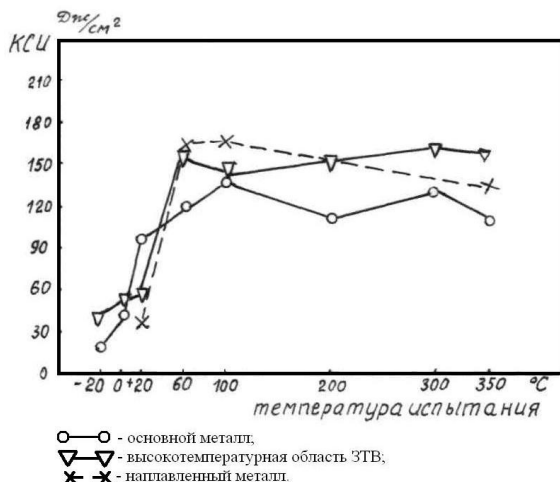


Рисунок 5 – Изменение ударной вязкости КСУ сварного соединения стали 15Х1М1ФЛ после сварки без последующей термообработки

Появление вязкой составляющей в изломах образцов металла высоко-температурной области ЗТВ указывает на формирование структуры с повышенным сопротивлением хрупкому разрушению в этом участке по сравнению с основным металлом, хотя КСУ его выше, чем ЗТВ. Такую особенность вязко-хрупкого разрушения можно объяснить тем, что при сварке способом поперечной горки этот участок испытывает значительные напряжения и пластические деформации в условиях постоянно меняющихся температур нагрева и охлаждения. При этом вследствие развития процессов динамической полигонизации и частичной рекристаллизации («in situ») создается измельченная субструктура аустенита, наследуемая образующимися при охлаждении продуктами распада (бейнитом, мартенситом) [7]. Такая структура обеспечивает высокую ударную вязкость при высокой прочности и повышает стойкость к образованию холодных трещин в околошовной зоне сварных соединений [8].

Следует также отметить, что при сварке способом поперечной горки обеспечивается автоподогрев, в результате чего металл шва и ЗТВ подвергаются самоотпуску, улучшающему их структуру и свойства до проведения послесварочного высокого отпуска.

Повышение температуры испытаний до +60°C приводит к резкому увеличению КСУ зон сварного соединения и основного металла до уровня 120-170 Дж/см², как в состоянии после сварки, так и после отпуска, за исключением металла шва абсолютное значение КСУ которого достигает 220 Дж/см² после

высокого отпуска. При температуре испытания $+100^{\circ}\text{C}$ значение КСУ отпущенного металла еще больше увеличивается, достигая $270 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$. Это объясняется тем, что в центре шва, при указанной широкой разделке, металл по химическому составу приближается к электродному, более качественному, нежели основной литой металл. Тенденция высокого уровня КСУ металла шва сохраняется и при испытании при $+350^{\circ}\text{C}$.

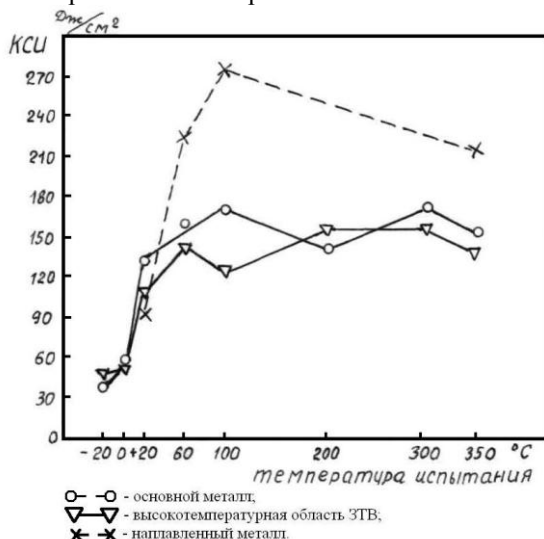


Рисунок 6 – Изменение ударной вязкости КСУ сварного соединения стали 15Х1М1ФЛ после сварки с последующим высоким отпуском

Повышение температуры испытаний включительно до $+350^{\circ}\text{C}$ стабилизирует уровень показателей КСУ основного металла и высокотемпературной области ЗТВ (рис.5 и 6). Вместе с тем КСУ высокотемпературной области ЗТВ в сварных соединениях без отпуска более высокая, чем в сварных соединениях, подвергавшихся после сварки высокому отпуску (рис.6).

Полученные закономерности создают предпосылки для вывода о том, что проведение высокого отпуска после сварки способом поперечной горки не оказывает заметного влияния на повышение сопротивления хрупкому разрушению в околосшовной зоне. Иначе ведет себя наплавленный металл, который после высокого отпуска имеет очень высокие значения КСУ, пониженную твердость в этой зоне (рис.2) и повышенную пластичность (рис.4). Совершенно очевидно, что послесварочный высокий отпуск оказывает заметно влияние на структурные превращения в наплавленном металле, уменьшая его склонность к хрупким разрушениям.

Выводы

1. После сварки стали 15Х1М1ФЛ, выполненной способом поперечной горки, прочностные и пластические свойства в зоне термического влияния

находятся на высоком уровне и не отличаются от свойств основного металла, хотя его твердость значительно ниже, как после сварки без термической обработки, так и с высоким отпуском.

2. Наибольшее сопротивление хрупкому разрушению при $+20^{\circ}\text{C}$ имеет металл околосварной зоны, свидетельством чего в изломах образцов с надразом в высокотемпературной области ЗТВ присутствует 30% вязкой составляющей, а в образцах других участков вязкой составляющей не обнаружено.

3. В сварных соединениях, полученных с применением способа поперечной горки, существенных различий вязкопластических свойств металла высокотемпературной области ЗТВ с послесварочным высоким отпуском и без него не установлено, что, очевидно, связано с автоподогревом и с процессами термдеформационного упрочнения. Однако, высокий отпуск соединений после сварки существенно улучшает свойства наплавленного металла, что подтверждает целесообразность его проведения.

Список использованных источников: 1 Синадский С.Е. Автоподогрев и автотермообработка при сварке поперечной горкой / С.Е. Синадский, В.И. Панов // Сварочное производство. – 1985. - №11. – С. 3-5. 2 Панов В.И. Универсальная методика ремонтной сварки крупногабаритных конструкций тяжелого машиностроения / В.И. Панов // Сварочное производство. – 2007. - №4. – С. 11-17. 3 Ефименко Н.Г. А.с. 1816595 СССР, А1 В23 К9/16. Способ многопроходной сварки // Н.Г. Ефименко, М.В. Орлов, Н.Е. Леверберг, Н.П. Воличенко. СССР. - №4902660/08. – Заявлено 30.10.90. – Опубл. 23.05.93. – Бюл. №19. 4 Козлов Р.А. Сварка теплоустойчивых сталей / Р.А. Козлов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 160 с. 5 Леверберг Н.Е. Влияние отпуска на свойства металла зоны термического влияния сталей 15Х1М1ФЛ, 15Х3М1ФЛ и 25Х2НМФА / Н.Е. Леверберг, С.И. Герман, О.П. Фомина, Е.М. Нетеса // Технология и организация производства. – 1983. - №2. – С.42-44. 6 Герман С.И. Электродуговая сварка теплоустойчивых сталей перлитного класса / С.И. Герман. – М.: Машиностроение, 1972.–200 с. 7 Бернштейн М.Л. Прочность стали / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с. 8 Анохов А.Е. Работоспособность литых корпусов из стали 20ХМФЛ, отремонтированных перлитными электродами без термообработки / А.Е. Анохов, Ф.А. Хромченко, И.В. Федина, И.Н. Ворновицкий, А.С. Позднякова // Сварочное производство. – 1985. - №3. – С.17-19.

Надійшла до редакції 15.03.2011

Bibliography (transliterated): 1 Sinadskij S.E. Avtopodogrev i avtotermostroobrabotka pri svarke poperechnoj gorkoj / S.E. Sinadskij, V.I. Panov // Svarochnoe proizvodstvo. – 1985. - №11. – С. 3-5. 2 Panov V.I. Universal'naja metodika remontoj svarki krupnogabaritnyh konstrukcij tjazhelogo mashinostroenija / V.I. Panov // Svarochnoe proizvodstvo. – 2007. - №4. – С. 11-17. 3 Efimenko N.G. А.с. 1816595 SSSR, А1 V23 К9/16. Sposob mnogoprohodnoj svarki // N.G. Efimenko, M.V. Orlov, N.E. Levenberg, N.P. Volichenko. SSSR. - №4902660/08. – Zayavleno 30.10.90. – Opubl. 23.05.93. – Bjul. №19. 4 Kozlov R.A. Svarka teploustojchivyh stalej / R.A. Kozlov. – L.: Mashinostroenie, 1986. – 160 s. 5 Levenberg N.E. Vlijanie otpuska na svojstva metalla zony termicheskogo vlijanija stalej 15H1M1FL, 15H3M1FL i 25H2NMFA / N.E. Levenberg, S.I. German, O.P. Fomina, E.M. Netesa // Tehnologija i organizacija proizvodstva. – 1983. - №2. – С.42-44. 6 German S.I. Jelektrodugovaja svarka teploustojchivyh stalej perlitnogo klassa / S.I. German. – М.: Mashinostroenie, 1972.–200 s. 7 Bernshtejn M.L. Prochnost' stali / M.L. Bernshtejn. – М.: Metallurgija, 1974. – 200 s. 8 Anohov A.E. Rabotosposobnost' lityh korpusov iz stali 20HMFL, otremonirovannyh perlitnymi jelektrodami bez termooobrabotki / A.E. Anohov, F.A. Hromchenko, I.V. Fedina, I.N. Vornovickij, A.S. Pozdnjakova // Svarochnoe proiz- vodstvo. – 1985. - №3. – С.17-19.